

دراسة إمكانية الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة مع الهواء الخارج من مبرد الكلينكر بمصنع أسمنت لبدة في إنتاج الطاقة الكهربائية

معمر أحمد العلوص^{1*}، خالد أوبكر عبدالصمد²، عبد الله الهادي أحمد³
^{3,1} كلية الهندسة، الخمس، جامعة المرقب، ليبيا
² مدرسة العلوم التطبيقية والهندسية، الأكاديمية الليبية للدراسات العليا، جنزور، ليبيا

Study the Possibility of Utilizing the Waste Thermal Energy from the Air Exiting the Clinker Cooler to Generate Electricity at Lebda Cement Factory

Muammer Ahmed Alus^{1*}, Khaled Bubaker Abdusamad², Abdulla Alhadi Ahmed³

^{1,3} Faculty of Engineering, Elmergib University, Alkhoms, Libya

² School of Applied Science and Engineering, Libyan Academy for Postgraduate Studies, Janzour, Libya

*Corresponding author: maalus@elmergib.edu.ly

Received: October 18, 2024

Accepted: December 20, 2024

Published: December 25, 2024

المخلص

الهدف من هذا البحث هو دراسة إمكانية الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة مع الهواء الخارج من مبرد الكلينكر في إنتاج الطاقة الكهربائية بمصنع أسمنت لبدة لغرض الاكتفاء الذاتي من الطاقة الكهربائية التي يحتاجها المصنع. تم في هذه الدراسة تحليل إمكانية استخدام مبادل حراري ضمن وحدة التوربين الغازي بهدف زيادة درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق. إجراء الحسابات اللازمة تمت لعدة حالات تشغيلية مختلفة، بالأخذ في الاعتبار درجات حرارة الهواء الخارج من مبرد الكلينكر. أظهرت نتائج الدراسة، بناءً على التحليل الرياضي والحسابات التي أجريت باستخدام النماذج المقترحة واستناداً إلى البيانات المأخوذة من غرفة التحكم في مصنع أسمنت لبدة، أن استخدام مبادل حراري بالنماذج المختارة لتسخين الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق غير ممكن. يعود ذلك إلى أن درجة حرارة الهواء الساخن الخارج من مبرد الكلينكر أقل من درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط في جميع النماذج المستخدمة بالدراسة، حيث يتراوح الفرق بينهما ما بين 18 °C إلى 100 °C.

الكلمات المفتاحية: وحدة التوربين الغازي، المبادل الحراري، الكلينكر، صناعة الأسمنت.

Abstract

The aim of this research is to study the possibility of utilizing the waste thermal energy from the air exiting the clinker cooler to generate electricity at Lebda Cement Factory, aiming for self-sufficiency in meeting the plant's electrical energy requirements.

The current study analyzed the feasibility of utilizing a heat exchanger within a gas turbine system to increase the temperature of the air entering the combustion chamber. The necessary calculations were conducted for various operational scenarios, taking into account the temperatures of the air exiting the clinker cooler.

The results of the study which is based on mathematical analysis and calculations performed using the proposed models and data obtained from the control room of the Lebda Cement Factory, indicate that utilizing a heat exchanger with the selected models to heat the air entering the combustion chamber is not feasible. This is because the temperature of the hot air exiting the clinker cooler is lower than that of the air exiting the compressor in all the models used in the study, with the temperature difference ranging from 18 °C to 100 °C.

Keywords: Gas turbine unit, Heat exchanger, Clinker, Cements industry.

1. المقدمة

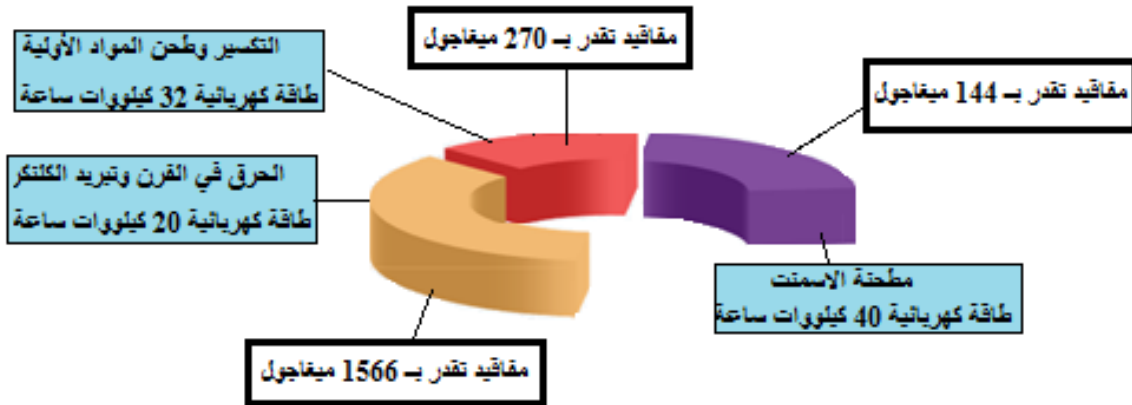
تُعد صناعة الأسمنت من أكثر الصناعات استهلاكاً للطاقة، حيث تتطلب كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية لحرق خليط من الحجر الجيري والطين والبازلت داخل أفران خاصة تصل درجات حرارتها إلى 1450 درجة مئوية. ينتج عن هذه العملية مادة الكلنكر، التي يتم تبريدها وطحنها ثم خلطها مع مادة الجص لإنتاج الأسمنت البورتلاندي [1].

تستهلك صناعة الأسمنت كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية في مختلف مراحل الإنتاج، بما في ذلك تكسير وطحن المواد الخام، تبريد الكلنكر، وطحنه. تختلف كمية الطاقة المستهلكة حسب طريقة التصنيع المعتمدة، وكفاءة المعدات المستخدمة، وحالتها الفنية. تُقدر الطاقة الحرارية النظرية اللازمة لتصنيع الكلنكر بما يتراوح بين 1.5 و1.85 جيجا جول لكل طن، في حين أن الطاقة الحرارية الفعلية المطلوبة تكون أعلى بكثير بسبب الفواقد الحرارية، حيث يبلغ متوسط الاستهلاك العالمي حاليًا حوالي 6.2 جيجا جول لكل طن من الكلنكر [1].

تُستخدم الطاقة الكهربائية في جميع مراحل الإنتاج، ومع تطور تقنيات صناعة الأسمنت، انخفض استهلاك الطاقة الكهربائية من نحو 130 كيلووات ساعة لكل طن من الأسمنت في ستينيات القرن الماضي إلى أقل من 90 كيلووات ساعة حاليًا. يتم توزيع الطاقة الكهربائية المستهلكة في صناعة الأسمنت وفق نسب مئوية محددة، كما هو موضح في الشكل (1)

- طحن المواد الخام 24 %.
- طحن الأسمنت 38 %.
- حرق وتبريد الكلنكر 22 %.
- المقالع والكسارات والتغليف والتحميل 10 %.
- الإنارة والخدمات الأخرى 6 %.

مخطط للمراحل الأساسية في صناعة الاسمنت وكميات الطاقة المستهلكة فيها لـ 1100 كجم حجر جيرى + 400 كجم بازلت



الشكل 1. مخطط مراحل صناعة الأسمنت، متوسط استهلاك الطاقة وكميات الطاقة الضائعة خلال مراحل الإنتاج [1]

1.1 مصنع لبدة للإسمنت

يقع مصنع إسمنت لبدة في منطقة سوق الخميس بمدينة الخمس، على بُعد 27 كيلومترًا من مركز المدينة. يُقام المصنع على مساحة تُقدَّر بحوالي 35 هكتارًا، ويعمل به حوالي 498 عاملاً من الكوادر الوطنية. يُنتج المصنع الإسمنت البورتلاندي العادي وفقًا للمواصفات القياسية الليبية، ويضم خط إنتاج واحد بطاقة تصميمية تبلغ مليون طن سنويًا.

تم التعاقد على إنشاء المصنع مع شركة Fives Cail Babcock (FCB) الفرنسية في مارس عام 1976، بتكلفة إجمالية قُدرت بـ 64,150,893 دينار ليبي. استغرق تنفيذ المشروع حوالي ثلاث سنوات من تاريخ توقيع العقد، حيث بدأت تجارب التشغيل في عام 1980، ودخل مرحلة الإنتاج الفعلي في عام 1981.

يتكون المصنع من عدد من الوحدات الأساسية، التي تُساهم في تنفيذ العمليات الإنتاجية بكفاءة، وهي كما يلي [2]:

- 1- المحاجر والمقالع.
- 2- الكسارات.
- 3- صوامع التخزين.
- 4- طاخونة المواد الخام.
- 5- الفرن الدوار.
- 6- طواحين الأسمنت.
- 7- قسم التعبئة.

1.1 مصنع لبدة للإسمنت

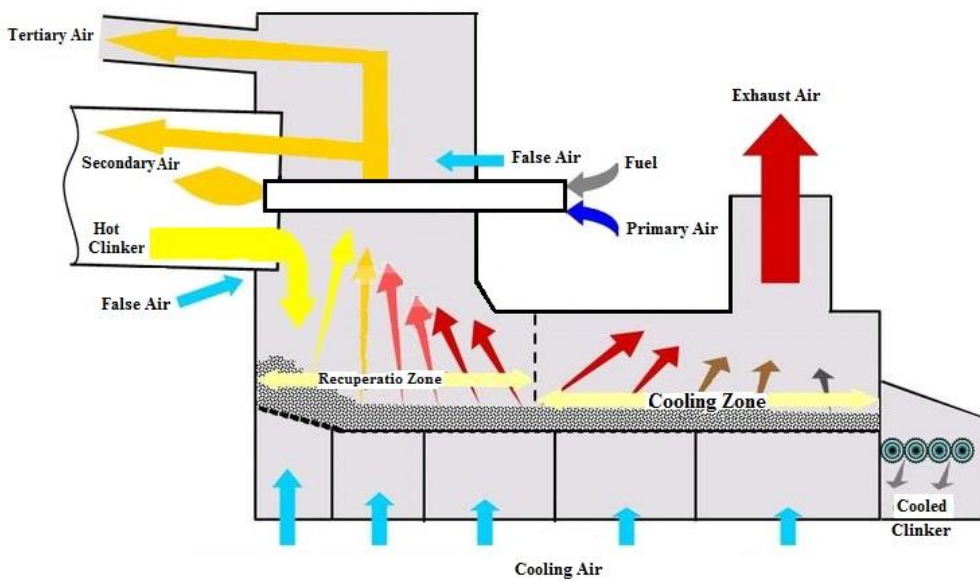
- تمر صناعة الاسمنت بمصنع اسمنت لبدة بعدة مراحل كما يلي [2]:
- 1- مرحلة تكسير المواد الخام.
 - 2- مرحلة طحن وتنعيم المواد الخام
 - 3- مرحلة الخلط والمجانسة
 - 4- مرحلة الحرق
 - 5- مرحلة التبريد
 - 6- مرحلة طحن الكلنكر
 - 7- مرحلة التعبئة

3.1 مرحلة التبريد بمبرد الكلنكر

بعد إتمام عملية الحرق، يخرج الكلنكر من الفرن بدرجة حرارة تصل إلى حوالي 1300°C ، حيث يتم نقله إلى المبرد لإجراء عملية تبريد سريعة باستخدام الهواء الخارجي، وهي خطوة ضرورية للحفاظ على خصائص مركبات الكلنكر. المبرد المستخدم في المصنع هو من النوع الحصري الأفقي، بطاقة تصميمية تعادل طاقة الفرن الانتاجية، والتي تبلغ 125 طنًا/ ساعة. يبلغ طول المبرد 29.3 مترًا وعرضه 3.956 مترًا، ويتم دفع الهواء الخارجي إلى المبرد بواسطة ضواغط هواء، حيث يحدث تبادل حراري بين الهواء والكلنكر، ما يؤدي إلى خفض درجة حرارة الكلنكر إلى حوالي 100°C كما هو موضح في الشكل (2).

يتم استغلال الهواء الساخن الناتج عن عملية تبريد الكلنكر بسحبه إلى الفرن الدوار والمسخن الأول عبر مروحة السحب الرئيسية للفرن. في نهاية المبرد، توجد كسارة مخصصة لتكسير الكلنكر إلى أحجام صغيرة، بحيث تتراوح أحجام الكلنكر الخارج ما بين 0 إلى 30 ملم كحد أقصى. أما الغازات الناتجة عن عملية التبريد، فتخرج من المبرد إلى المصفي السليكوني، ومنه إلى مدخنة المصفي التي يبلغ ارتفاعها 33 مترًا وقطرها 4 أمتار.

يُنقل الكلنكر البارد إلى مخزن خاص عبر سير حديدي. يتميز المخزن بكونه مغطى ومنشر طولي مغطى سعته 60 ألف طن به جزء بسيط لتخزين الكلنكر الغير جيد الحرق، والجزء الأكبر للكلنكر جيد وجاهز للسحب إلى طواحين الأسمنت لتتم عملية التكديس داخل المخزن عن طريق عربة توزيع طولية، وتتم عملية السحب بطريقة الجرف للأسفل إلى سير مطاطي يصل إلى وحدة طواحين الأسمنت [2].



الشكل 2. مبرد الكلنكر [2]

4.1 الدراسات السابقة

تركزت العديد من الدراسات والبحوث المنشورة على صناعة الأسمنت واستهلاك الطاقة فيها على تحسين الكفاءة وتقليل التكاليف والآثار البيئية.

قام فتحي كعوان وزملاؤه [3] بدراسة وتحليل نموذج استرداد الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم في مصنع أسمنت لبدة لغرض توليد الطاقة الكهربائية عبر دورة رانكن البخارية، وأظهرت النتائج أن القدرة المتولدة باستخدام هذه الدورة تبلغ 9.014 ميجاوات وكفاءة تصل 27.14%.

أجرى أحمد نبيل سيد محمد وزملاؤه [4] دراسة نظرية تناولت الأهمية الاقتصادية والبيئية لاستخدام بدائل الطاقة مثل: الإطارات، الخردة والمخلفات الصلبة لتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية في إنتاج الأسمنت بدولة مصر. هدفت الدراسة إلى تحديد البدائل الممكنة للطاقة في هذه الصناعة وتحليل أثارها الاقتصادية والبيئية. خلصت النتائج إلى أن استخدام المخلفات كوقود بديل للوقود الأحفوري والغاز الطبيعي يمكن أن يقلل من تدهور البيئة واستنزاف الموارد الطبيعية، مما يعزز مفهوم التنمية المستدامة.

من جهة أخرى، قام Alaa H. Salloom وزملاؤه [5] بدراسة جدوى تركيب نظام استعادة الحرارة المهدورة باستخدام دورة رانكين الحرارية العضوية (ORC) في مصنع أسمنت بدولة العراق. بينت الدراسة إمكانية توليد 5.9 ميجاوات من الكهرباء عبر استغلال الطاقة الحرارية المهدورة، وأظهرت أنه عند استخدام النظام العضوي لإعادة تدوير الغازات الساخنة في مصنع بطاقة إنتاج يومية 6000 طن، يمكن توفير 82.5 طن من زيت الوقود يوميًا، وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 99.12 طن يوميًا.

كما أجرى معمر إحميد وزملاؤه [6] دراسة مقارنة بين نوعين من المرشحات المستخدمة في المصانع الليبية، وهما مرشحات الطرد المركزي في مصنع لبدة للإسمنت والمرشحات القماشية في مصنع المرقب للإسمنت. تناولت الدراسة تأثير كمية الغبار وحجم الحبيبات على كفاءة المرشحين. أظهرت النتائج أن المرشح القماشي يتفوق على مرشح الطرد المركزي بكفاءة تزيد بنسبة 1%، مع تقارب في تأثير حجم الحبيبات على الكفاءة، حيث كان الحجم المثالي للحبيبات يتراوح بين 100 إلى 200 ميكرومتر.

استنادًا إلى هذه الدراسات، تم التركيز بهذا البحث على استغلال الطاقة الحرارية المهدورة من الهواء الخارج من مبرد الكلنكر في مصنع أسمنت لبدة /الخمس والتابع للشركة الأهلية للإسمنت المساهمة بهدف توليد الطاقة الكهربائية لسد احتياجات المصنع من الكهرباء، والتي تُقدر بحوالي 15 ميجاوات.

2. منهجية العمل بالدراسة

استنادًا إلى البيانات الفنية المتعلقة بالهواء الخارج من مبرد الكلنكر في مصنع أسمنت لبدة /الخمس والتابع للشركة الأهلية للإسمنت المساهمة، تبين وجود كمية كبيرة من الطاقة الحرارية المهدورة على شكل حرارة متبددة إلى المحيط الخارجي. يحدث هذا الفقد الحراري في مبرد الكلنكر المستخدم لتبريد المواد الخام الخارجة من فرن معالجة الأسمنت، حيث تصل درجة حرارة الهواء الخارج من المبرد إلى 350°C كما هو موضح في الجدول (1).

دفعنا ذلك إلى دراسة إمكانية استغلال هذه الحرارة المهدورة (الهواء الساخن الخارج من الكلنكر للهواء الجوي) لتوليد الطاقة الكهربائية، وذلك من خلال استخدام مبادل حراري قبل غرفة الاحتراق يهدف رفع درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق، وذلك باستخدام عدة نماذج مختارة لوحدة التوربين الغازي المقدمة من شركات تصنيع مختلفة.

تمت الحسابات في هذه الدراسة باستخدام لغة البرمجة Fortran 90، بينما تم تقييم النتائج المتحصّل عليها باستخدام برنامج Excel .

الجدول 1. البيانات الفنية للهواء الخارج من مبرد الكلنكر [7]

الحد الأدنى للقدرة الانتاجية بالمصنع	الحد الأعلى للقدرة الانتاجية بالمصنع	المتغيرات
0.3 bar	1.5 bar	ضغط الهواء الخارج
180 $^{\circ}\text{C}$	350 $^{\circ}\text{C}$	درجة حرارة الهواء الخارج
138 m^3/s	210 m^3/s	معدل التدفق الهواء

3. نماذج وحدة التوربين الغازي المختارة بالدراسة

بهذه الدراسة تم اختيار عدة نماذج لوحدة التوربين الغازي المصنعة من قبل عدة شركات متخصصة بهذا المجال حسب الجدول (2) [8،9،10]. هذا النوع من الوحدات يلبي استهلاك مصنع أسمنت لبدة من الطاقة الكهربائية بالكامل والتي تقدر بحوالي 15 MW ويزيد عن ذلك.

الجدول 2. المواصفات الفنية لوحدات التوربين الغازي المختارة للدراسة [9,10,8]

نماذج وحدة التوربين الغازي المختارة			المتغيرات
SGT-750 Mechanical Drive	Simple Gas Turbine Cycle / Alstom GT24/1994	Simple Gas Turbine Power Plant/ GE 9FA-03	
41 MW	187 MW	265 MW	قدرة الوحدة عند المولد الكهربائي
41.6 %	36.5 %	37.8 %	الكفاءة الحرارية لوحدة التوربين
24.3	12.8	16.7	نسبة الانضغاط
115.4 kg/s	558 kg/s	648.5 kg/s	معدل تدفق غازات العادم
482 °C	536 °C	596 °C	درجة حرارة غازات العادم الخارج من التوربين

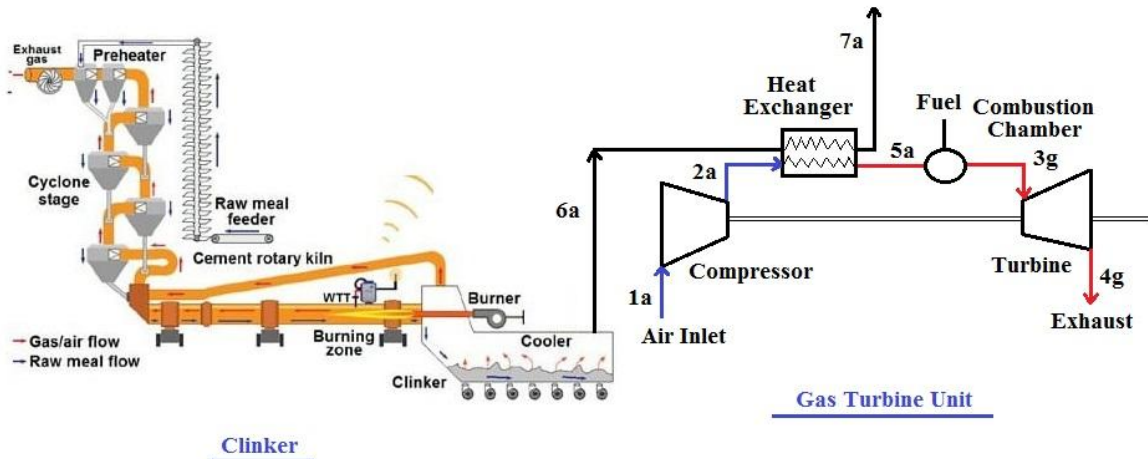
4. التحليل الرياضي لوحدة التوربين الغازي

تم حساب خصائص الهواء وغازات العادم لوحدات التوربين الغازي الموضحة بالجدول (2) وفقاً للمرجع (Baehr et al) [11] باستخدام لغة الفورتران (FORTRAN 90)، ومن أهم المتغيرات التيرومديناميكية في هذه الدراسة هي: درجة حرارة الهواء الخارجة من الضاغط.

الشكل (3) يوضح مخطط لدورة غاز بسيطة لوحدة التوربين الغازي. يعتمد حساب درجة حرارة الهواء الخارجة من الضاغط (T_{2a}) بهذه الدراسة على كل من درجة حرارة الهواء الداخلة الى الضاغط ونسبة الانضغاط (X_p)، ويمكن حسابها من المعادلة التالية [9]:

$$T_{2a} = T_{1a} \times \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{is,c}} \left[X_p^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}} - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

حيث $\eta_{is,c}$ الكفاءة الأيزونتروبية للضاغط، $\gamma_a = 1.4$.



الشكل 3. الاستفادة من الهواء الخارج من الكليكر باستخدام وحدة التوربين الغازي باستخدام مبادل حراري

الجدول (3) المبين أدناه، يوضح الفرضيات المستخدمة بالحسابات السابقة بهذه الدراسة وفقاً للمرجعين (معمر العلوص والكل و Alus.& Petrovic) [9,10].

من المعروف أنه بالنسبة للمحركات ذات السرعة الثابتة، يكون معدل التدفق الحجمي للهواء ($Q_{Flow,air}$) ثابت تقريباً، فالزيادة في درجة حرارة المحيط تقلل من كثافة الهواء وأيضاً تقلل من معدل التدفق الكتلي للهواء وهكذا يمكننا

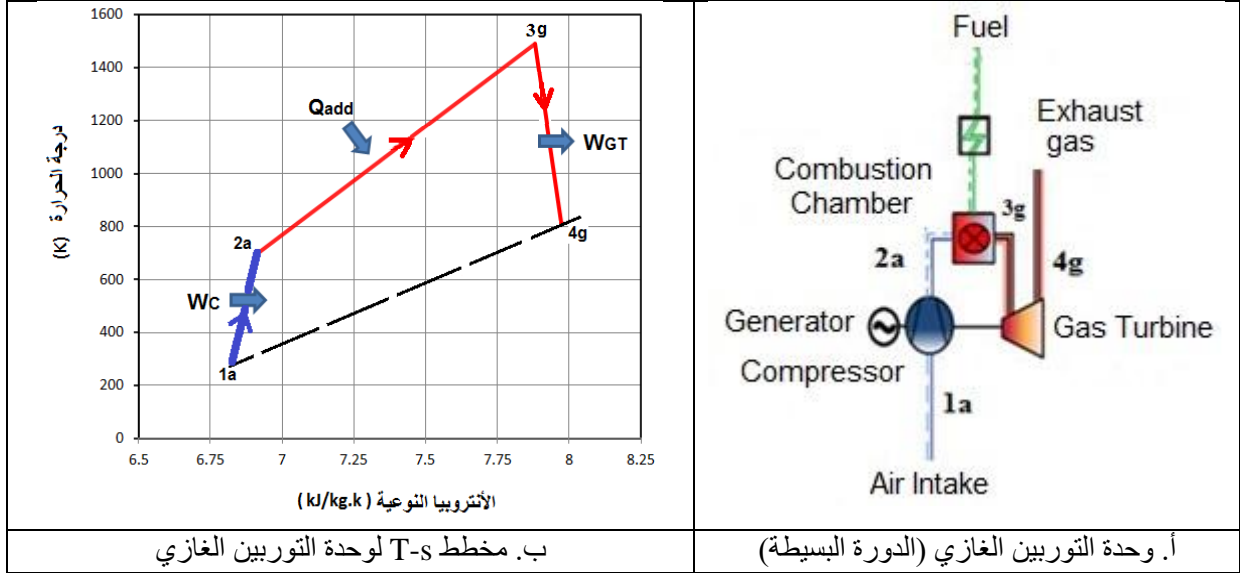
استنتاج أن القدرة المنتجة من وحدة التوربين الغازي تقل للحفاظ على معدل تدفق حجمي ثابت للهواء، يمكننا حساب كثافة الهواء الداخل للضاغط من خلال المعادلة التالية

$$\rho_{1a} = \frac{P_{1a}}{R_a T_{1a}} \quad (2)$$

الشغل النوعي للضاغط لوحدة التوربين الغازي يمكن حسابه كالاتي

$$w_C = c_{pa} \times (T_{2a} - T_{1a}) \quad (3)$$

حيث T_{1a} درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط وهي تعتمد علي درجة حرارة البيئة المحيطة بوحدة التوربين



الشكل 3. وحدة التوربين الغازي لمحطة الخمس الغازية [9]

الجدول 3. الفرضيات المستخدمة بالمثال المستخدم بالدراسة [9،10]

القيمة	الفرضيات
87 %	الكفاءة الأيزونترودية لضاغط الهواء
92 %	الكفاءة الأيزونترودية للتوربين الغازي
99 %	كفاءة غرفة الاحتراق
98 %	الكفاءة الميكانيكية
98 %	كفاءة المولد الكهربائي
0.015	الهبوط في الضغط خلال غرفة الاحتراق بوحدة التوربين الغازي
0.02	الفقد في ضغط الخروج من التوربين الغازي
	درجة حرارة غازات العادم الداخلة للتوربين الغازي ثابتة
	معدل التدفق الحجمي للهواء ثابت

الشغل النوعي للتوربين الغازي يمكن حسابه كالاتي

$$w_{GT} = c_{pg} \times (T_{3g} - T_{4g}) \quad (4)$$

حيث T_{3g} درجة حرارة غازات العادم الداخلة الى التوربين، T_{4g} درجة حرارة غازات العادم الخارجة من التوربين. يمكننا حساب معدل التدفق الحجمي للهواء كالاتي

$$Q_{Flow,air} = V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2 \quad (5)$$

حيث (A_1, A_2) هي مساحة المقطع عند مدخل ومخرج الضاغط على التوالي، و (V_1, V_2) سرعة الهواء عند مدخل ومخرج الضاغط على التوالي.

يمكن حساب معدل التدفق الكتلي للهواء من المعادلة التالية

$$\dot{m}_a = \rho_{1a} \times Q_{Flow,air} \quad (6)$$

القدرة الصافية لوحدة التوربين الغازي و المنتجة عند المولد الكهربائي ، تحسب من المعادلة التالية

$$W_{GT,net} = \dot{m}_a \times \eta_m \times \eta_g \times (w_{GT} - w_C) \quad (7)$$

حيث η_m الكفاءة الميكانيكية و η_g الكفاءة الكهربائية.
الكفاءة الحرارية لوحدة التوربين الغازي يمكن حسابها

$$\eta_{GT} = \frac{W_{GT,net}}{\dot{m}_f \times LHV} \quad (8)$$

5. النتائج و المناقشة

تم في هذه الدراسة استخدام مبادل حراري ضمن وحدة التوربين الغازي، كما هو موضح في الشكل (3)، مع جميع النماذج المستخدمة، والمبينة في الجدول (2). الهدف هو الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة مع هواء التبريد الخارج من الكونكر، وفقاً للمواصفات الفنية الموضحة في الجدول (1). يتم تركيب المبادل الحراري قبل غرفة الاحتراق في وحدة التوربين الغازي، بهدف رفع درجة حرارة الهواء الداخل إلى غرفة الاحتراق، مما يساهم في تقليل الاستهلاك النوعي للوقود في التوربين.

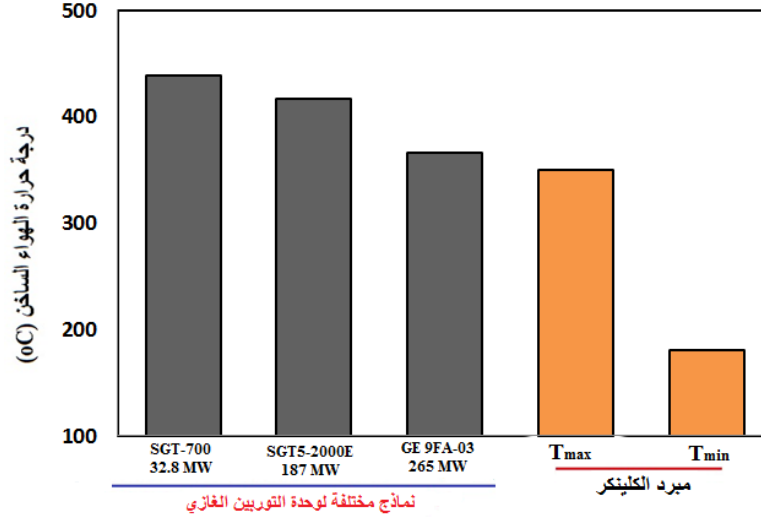
علاوة على ذلك، تم حساب درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط لمختلف نماذج وحدات التوربين الغازي باستخدام المعادلة (1).

أظهرت النتائج، كما هو موضح في الجدول (4)، أن درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط لجميع النماذج المقترحة أعلى من درجة حرارة الهواء الخارج من مبرد الكونكر. يتراوح الفرق بينهما من حوالي 16 °C كحد أدنى إلى حوالي 260 °C كحد أقصى.

يكون استخدام المبادل الحراري فعالاً فقط عندما تكون درجة حرارة الهواء الخارج من مبرد الكونكر أعلى بشكل كافٍ من درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط. هذا الشرط يضمن أن يخرج الهواء من المبادل الحراري بدرجة حرارة مساوية أو أعلى قليلاً من درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط

الجدول 4. درجات حرارة الهواء الخارج من الضاغط لوحدات التوربين المختارة.

نماذج وحدة التوربين الغازي المختارة			المتغيرات
Simple Gas turbine Cycle / Siemens- SGT-700 Power Generation	Simple Gas turbine Cycle / Siemens- SGT5-2000E	Simple Gas Turbine Power Plant/ GE 9FA-03	
32.8 MW	187 MW	265 MW	قدرة الوحدة عند المولد الكهربائي
18.7	12.8	16.7	نسبة الانضغاط
439 °C	366 °C	416.5 °C	درجة حرارة الهواء الخارج من الضاغط
18.94 bar	12.97 bar	16.92 bar	ضغط الهواء الخارج من الضاغط
Tmax= 350 °C		Tmin = 180 °C	درجة حرارة الهواء الخارج من الكلينكر



الشكل 5. مقارنة بين درجات حرارة الهواء الخارج من الضاغطة لوحدتين توربين والخارج من الكلينكر.

6. الاستنتاج والتوصيات

الهدف من هذا البحث هو دراسة إمكانية الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة مع الهواء الخارج من مبرد الكلينكر في إنتاج الطاقة الكهربائية بمصنع أسمنت لبدء لغرض الاكتفاء الذاتي من الطاقة التي تحتاجها المصنع. بهذا البحث تمت دراسة إمكانية إجراء مبادل حراري قبل غرفة الاحتراق لغرض رفع درجة حرارة الهواء الداخل لغرفة الاحتراق لعدة نماذج مختارة من شركات تصنيع مختلفة لوحدتين التوربين الغازي. من خلال النتائج المتحصل عليها تبين أن درجات حرارة الهواء الخارج من الضاغطة لجميع نماذج وحدات التوربين الغازي المقترحة بالدراسة أكبر من الهواء الخارج من الكلينكر ($T_{2a} > T_{6a}$) ويتراوح الفرق بينهما للحد الأدنى تقريباً 16°C والحد الأقصى تقريباً 260°C ، وبهذا نستنتج أن الحرارة المفقودة مع الهواء الخارج من الكلينكر لا تصلح في عملية تبادل حراري (استخدام مبادل حراري قبل غرفة الاحتراق) مع الهواء الخارج من الضاغطة لجميع النماذج لوحدات التوربين الغازي التي استعملت بالدراسة.

7. قائمة المراجع

- [1] علي بالوالي، إنتاج الإسمنت الطريقة الجافة، دار الكتب العراقية، 2014.
- [2] كاتولك الشركة المصنعة لمصنع اسمنت لبدء، الشركة المصنعة، 2000.
- [3] فتحي كعوان، محمد الصويد، حسن الدروقي، كمال النفاثي، سراج الشريف، "دراسة تحليلية للاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم في مصنع إسمنت لبدء لتوليد الطاقة الكهربائية"، المؤتمر العلمي الرابع للعلوم الهندسية والتقنية (CEST) زليتين، 306-320، 2021.
- [4] أحمد نبيل سيد محمد، عمرو حسين عبد البر، عيد رشاد عبد القادر وهدى إبراهيم احمد هلال، "الأثار الاقتصادية والبيئية لبدائل الطاقة في صناعة الأسمنت المصرية وانعكاسها على التكاليف"، مجلة علوم البيئة، 46(3)، 293-318، 2019.
- [5] A. Salloom*, B. Ismail, S. Sadik, "Opting of an Organic Rankine Cycle Based on Waste Heat Recovery System to Produce Electric Energy in Cement Plant", Iraqi Journal of Industrial Research (IJOIR), 9(2), 2022.
- [6] معمر إحميد، معمر العلوص، علي أبوراس، حسن الدروقي، عبدالله المائل، "دراسة عملية لمقارنة أداء مرشحات الغبار المستخدمة في مصانع الإسمنت الليبية (مصنعي لبدء والمرقب)"، المؤتمر العلمي الرابع للعلوم الهندسية والتقنية (CEST) زليتين، 2021.
- [7] القراءات الفنية التشغيلية لمبرد الكلينكر، مصنع أسمنت لبدء، الشركة الأهلية للإسمنت المساهمة.
- [8] <https://etn.global/gas-turbine-products/>

- [9] معمر أحمد العلوص ، خالد أبوبكر عبدالصمد و عبدالله أحمد الهادي، ” دراسة تحسين الأداء الحراري لوحدة توربين غازي: محطة الخمس الغازية“، مجلة الجامعة الأسمرية: العلوم الأساسية و التطبيقية ، 7 (2) ، 38-77 ، 2022 .
- [10] M. Alus, M.V. Petrovic, “Optimization of parameters for heat recovery steam generator (HRSG) in combined cycle plants”. Thermal Science: 16(3), 901-914, 2012.
- [11] H.D. Behr, C. Diederichsen, “Berechnungsgleichungen fuer Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen BWK”, 40 (1/2), 30–33, 1988.